平谱射电类星体 B3 0307+380 的 15 GHz 射电光变分析*

杨星，易庭丰，毛李胜

（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明 650500）

摘要：欧文斯谷射电天文台(OVRO)的长时间监测数据显示平谱射电类星体 B3 0307+380 的 15 GHz 射电光变曲线中表现出多个爆发过程．基于双指数函数，拟合了 12 个爆发过程，得到了每个爆发过程的光变幅度和上升、下降时标，进而估算了亮温度 T_b 和光变多普勒因子 δ_V．多普勒因子范围为 $(9.12\pm0.58)\sim(35.38\pm3.34)$，平均值 $\overline{\delta_V}$ 为 $18.65\pm7.11(sd)$．这个结果表明此源的射电辐射存在明显的聚束效应，支持主流的相对论性喷流模型．利用 Lomb-Scargle 周期图(LSP)方法和加权小波分析(WWZ)方法，探讨了 B3 0307+380 是否存在周期性光变，发现存在一个较高置信度（>99%）的约 244 天的周期，并简要讨论了周期可能的存在原因．

关键词：耀变体；亮温度；多普勒因子；周期

中图分类号： **P162** **文献标识码**： **A** **文章编号**：

耀变体(Blazar)是一类喷流与视线方向近似平行的活动星系核，其观测特征包括宽波段电磁辐射、高光度、高偏振、视超光速运动等[1]．耀变体包括平谱射电类星体(FSRQs)与蝎虎型天体(BL Lacertae Objects)两个子类， 两者的差别主要体现在光谱中有无宽发射线[1]．普遍认为， 耀变体在几乎整个电磁波段都表现出各种时标（从几分钟到几年量级不等）的光变，少数耀变体表现出周期性光变现象[2-5]．光变研究一直是探索耀变体内部辐射过程和物理机制的最有效手段之一．由于耀变体喷流的方向与观测视线之间的夹角小($\theta<10^o$)，耀变体的辐射因多普勒效应而被增强[1][6]．多普勒因子(δ)可以通过喷流中物质流速度（β）以及视角（θ）这两个本征参数来定义．然而这两个量都是不可直接观测的量，因此用新的其他方法来估算多普勒因子就显得很必要．在各种估算多普勒因子的方法中， 通过射电光变估算多普勒因子(δ_V)的方法相对比较简单，因而被广泛应用[7-10]．

B3 0307+380 ($RA=47.7078^\circ$，$Dec=38.2483^\circ$) 是一个被探测到伽马射线辐射的平谱射电类星体[11]，红移 $z=0.816$．本文利用欧文斯谷射电天文台(Owens Valley Radio Observatory，缩写为 OVRO) [12]的 15 GHz 长时间监测数据（观测时长约 11.4 年，观测时间从 2008 年 1 月 8 日到 2019 年 5 月 25 日）， 研究 B3 0307+380 的射电光变，估算射电亮温度和光变多普勒因子，并考察是否存在周期性光变．采用的宇宙学参数为 $H_0=73km\cdot s^{-1}\cdot Mpc^{-1}, \Omega_{matter}=0.27$，$\Omega_{vacuum}=0.73$．

*基金项目：国家自然科学基金(11863007)资助；云南省高校高能天体物理重点实验室项目资助．

作者简介：杨星，男，硕士研究生，研究方向：活动星系核．

通讯作者：毛李胜，男，讲师，研究方向：活动星系核. Email: maolisheng@ynnu.edu.cn

1 数据

利用 OVRO 的官网（http://www.astro.caltech.edu/ovroblazars/），获取了 B3 0307+380 的 15 GHz 长时间测光数据. 去除少量的坏点后， 最后采用的测光数据包括 664 个点， 约化儒略日 MJD 范围约为 54473 - 58628. 图 1 给出了光变曲线，横坐标为 MJD，纵坐标为以 Jy 为单位的 15 GHz 流量及误差(大部分误差很小，无法在图中分辨).

2 多普勒因子估算

基于光变时标所限定的尺度，文[13]给出了耀变体亮温度的计算公式:

$$T_b = (4.5\times10^{10})\Delta F\left[\frac{\lambda D}{t_{ob}(1+z)}\right]^2 K \qquad (1)$$

式中，T_b 亮温度，ΔF 以 Jy 计的流量变化值（光变幅度），t_{ob} 以天计的光变时标，λ 以厘米计的观测波长，D 以 Mpc 计的光度距离.

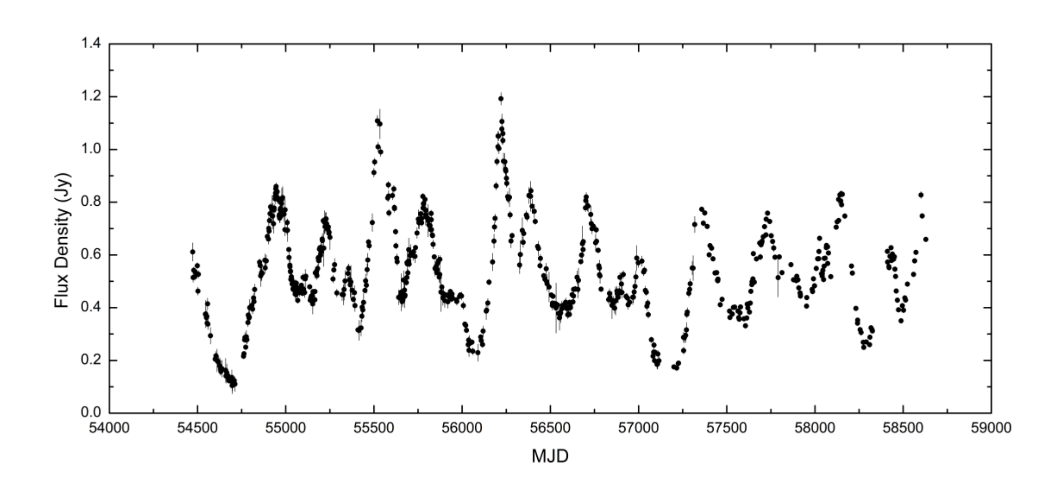


图 1　B3 0307+380 的 15 GHz 光变曲线

Fig. 1　The 15 GHz light curve of B3 0307+380

图 1 显示 B3 0307+380 的射电光变曲线中表现出多个爆发过程. 我们从中挑选出 12 个包含上升和下降阶段的完整爆发过程， 采用文[14]提供的双指数函数公式拟合这 12 个爆发过程. 具体公式如下:

$$F(t) = F_c + F_0\left(e^{\frac{t_0 - t}{t_r}} + e^{\frac{t - t_0}{t_d}}\right)^{-1} \qquad (2)$$

式中，F_c 表示基底流量，t_0 表示峰对应的时间，t_r 和 t_d 分别表示指数上升时标和下降时标，F_0 衡量爆发的幅度.

我们利用基于 Python 语言的 LMFIT 程序包进行非线性最小二乘拟合，调用的函数是 leastsq()，详情请参考 https://lmfit.github.io/lmfit-py/. 拟合的基本原理是使得观测流量值 $f(t_i)$ 与函数推断流量值 $F(t_i)$ 的残差平方和 SSR 达到最小，$SSR=\sum_{i=1}^{N}[f(t_i)-F(t_i)]^2$，$N$ 为观测点个数. Levenberg–Marquardt (LM)**算法是一种求解非线性模型的数值算法**，常被**应用于最小二乘曲线拟合**[15]. 我们调用的函数 leastsq()也是基于这种算法.

12 个爆发过程的拟合详情和参数展示在图 2 和表 1 中. 第 1 列为爆发的序号；第 2 列为爆发对应的约化儒略日范围；第 3 列为观测点个数 N；第 4 列为拟合所得的约化最小残差平方和 $\hat{\beta}$，$\hat{\beta}=\frac{SSR_{\min}}{d.o.f}$，$SSR_{\min}$ 为最小残差平方和，自由度 $d.o.f=N-5$；第 5 至第 9 列给出了 5 个拟合参数及其误差. 利用拟合参数 F_0，t_r 或 t_d，以及公式（1）计算了每个上升或下降阶段对应的亮温度 T_b. 比对拟合公式（1）与文[7]中的公式（2），我们强调在计算每个上升或下降阶段对应的亮温度 T_b 时，ΔF 值宜取拟合参数 F_0 的一半.

一般认为，耀变体的喷流成分对应的亮温度 T_b 不能超过逆康普顿极限温度 $T_{IC}=10^{11.5}K$ [16]，或不能超过平衡亮温度 $T_{eq}=5\times10^{10}K$ [17]. 我们计算出来的亮温度 T_b 约分布在 $(3.79\pm0.73)\times10^{13}\sim(2.21\pm0.63)\times10^{15}K$，超过 T_{IC} 或 T_{eq} 几个量级，表明存在显著的多普勒增亮效应. 类似文[8]，我们选取 T_{eq} 作为内禀亮温度. 利用如下公式，进一步估算了对应的光变多普勒因子：

$$\delta_V=(\frac{T_b}{T_{eq}})^{1/3} \quad (3)$$

图 3 给出了多普勒因子 δ_V 的分布情况. δ_V 的值分布在 $(9.12\pm0.58)\sim(35.38\pm3.34)$，平均值为 18.65 ± 7.11（sd），中值约为 18.14.

表 1　爆发过程的拟合结果

Table 1　The results of flare fitting

No. (1)	MJD range (2)	N (3)	$\hat{\beta}$ (4)	t_0 (5)	F_c (6)	F_0 (7)	t_r (8)	t_d (9)
1	54696.4 - 55080.4	106	1.73E-03	54958.98 ±10.53	0.01 ±0.05	1.56 ±0.08	106.61 ±13.14	87.94 ±6.25
2	55139.2 - 55319.8	44	7.42E-04	55228.74 ±5.75	0.37 ±0.03	0.71 ±0.05	36.19 ±6.22	34.29 ±4.89
3	55409.5 - 55665.8	41	3.91E-03	55521.03 ±8.63	0.11 ±0.09	1.82 ±0.17	47.24 ±7.54	84.41 ±12.07
4	55666.8 - 55969.9	74	9.87E-04	55797.15 ±5.91	0.41 ±0.01	0.73 ±0.03	60.11 ±5.28	40.34 ±4.84
5	56060.9 - 56325.9	38	1.84E-03	56201.10 ±3.22	0.28 ±0.02	1.41 ±0.08	20.86 ±2.36	64.36 ±6.19
6	56330.3 - 56586.5	42	5.78E-04	56382.04 ±7.73	0.38 ±0.01	0.86 ±0.02	39.05 ±6.16	44.63 ±6.12
7	56529.4 - 56859.5	61	6.44E-04	56704.68 ±3.50	0.39 ±0.01	0.78 ±0.03	25.01 ±2.29	47.10 ±3.75
8	56941.3 - 57115.8	27	5.53E-04	57035.45 ±4.46	0.19 ±0.02	0.65 ±0.07	79.13 ±12.44	19.22 ±3.28
9	57200.6 - 57531.7	35	7.28E-04	57313.57 ±3.28	0.15 ±0.02	0.98 ±0.05	27.96 ±2.71	132.94 ±9.36
10	57597.8 - 57813.2	32	1.14E-03	57706.77 ±27.12	0.15 ±0.17	1.07 ±0.39	65.35 ±30.74	110.41 ±30.88
11	58090.2 - 58309.5	22	5.61E-04	58157.86 ±8.50	0.20 ±0.03	1.22 ±0.06	52.55 ±7.67	41.70 ±6.46
12	58276.7 - 58488.3	23	6.59E-04	58449.49 ±7.22	0.20 ±0.05	0.72 ±0.06	67.12 ±20.63	23.44 ±3.77

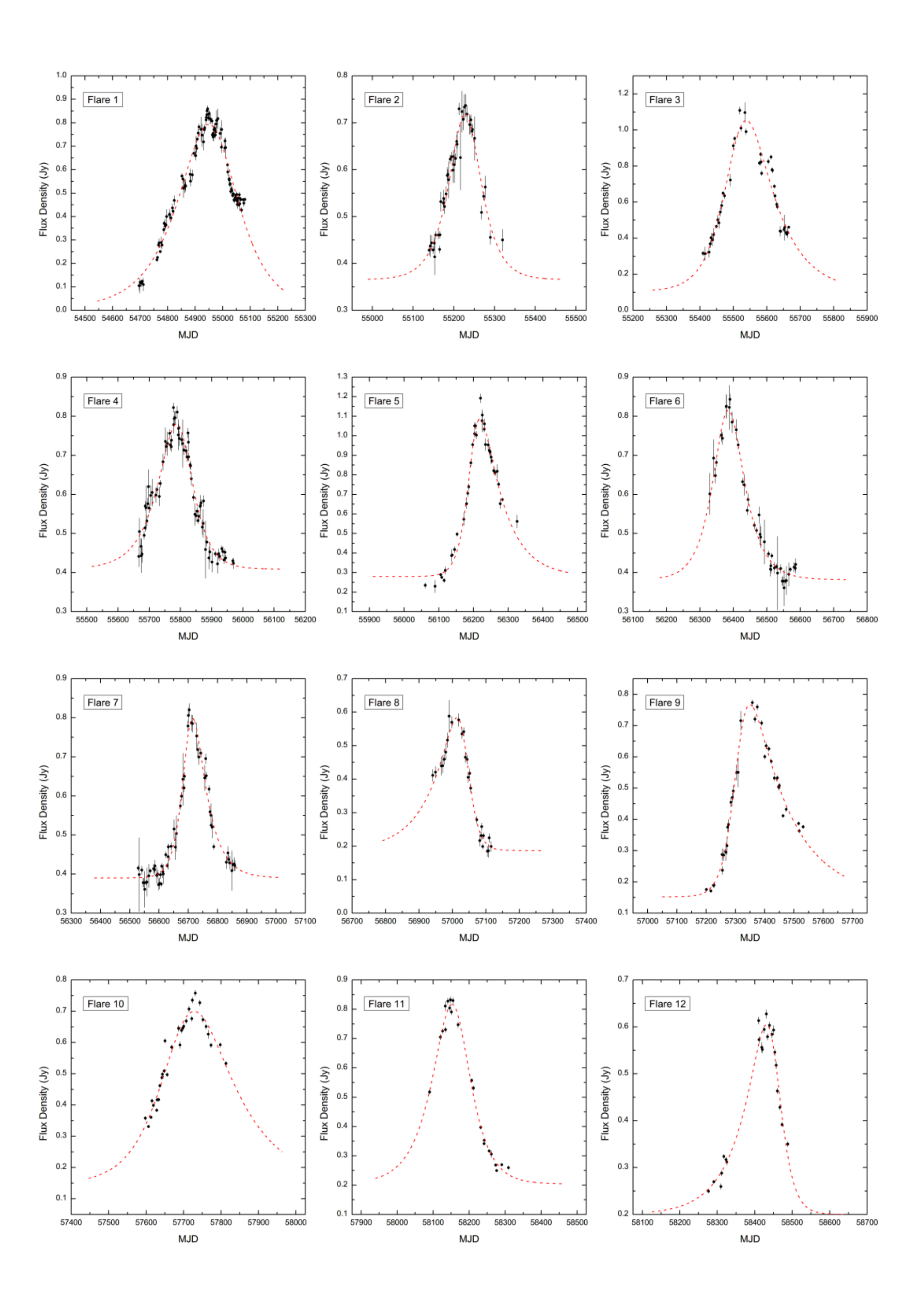


图 2　12 个爆发过程的曲线拟合

Fig. 2　Curve fitting of twelve flares

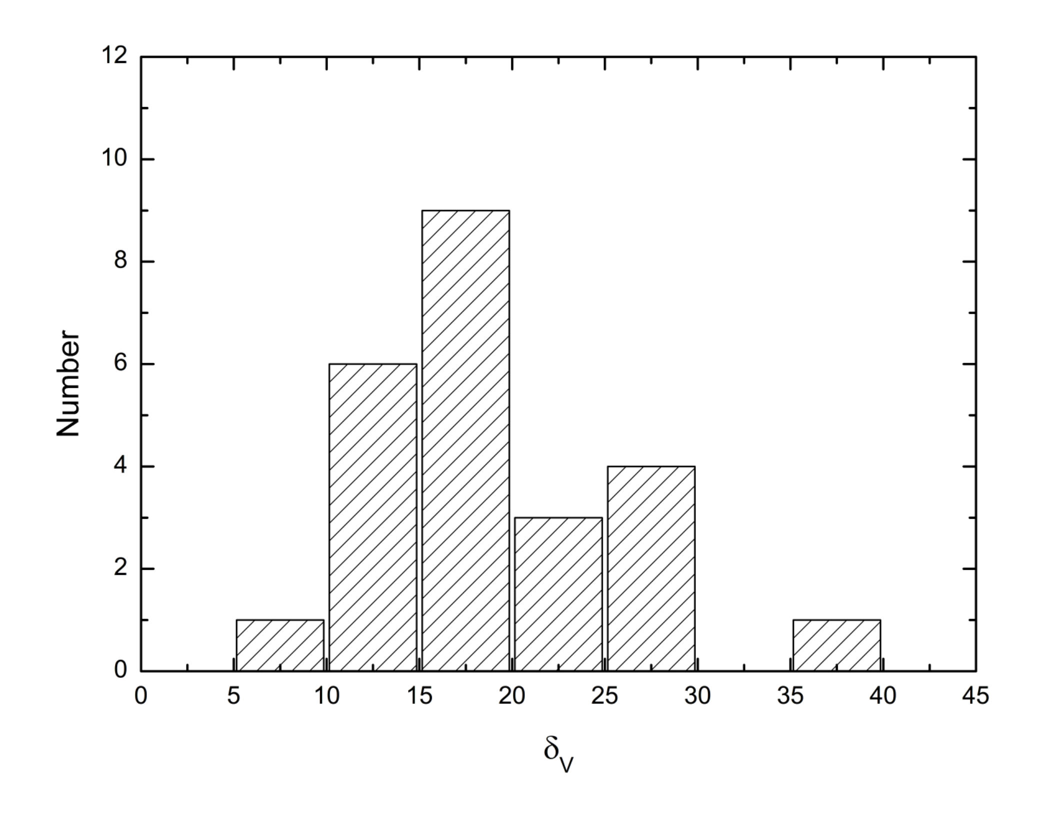


图 3 光变多普勒因子 δ_V 的分布

Fig. 3 The distribution of variability Doppler factor δ_V

3 周期分析

历史文献中不断有关于耀变体周期性光变的报道[18][19]. 耀变体的周期性光变研究， 对理解其内部辐射的物理机制和辐射区的几何性质有着重要的意义. 目前， 在天文学上比较常用的周期分析方法有 Lomb-Scargle 周期图(LSP)方法[20][21]和加权小波分析方法(WWZ)[22]等. 我们也利用这两种方法探索了 B3 0307+380 的 15 GHz 光变曲线是否存在周期光变，结果列在图 4 中. 图 4 左图为 LSP 分析结果，图中我们按照文[23]提供的基于红噪声的蒙特卡洛方法给出了 95%、 99%、99.7%置信度曲线. 结果可看出，存在一个约 244±11天的 > 99% 置信度的周期，同时也存在一个约 465±40天的 > 99% 置信度的周期，后者大约为前者的两倍. 图 4 右图为加权小波分析结果， 图中也大致可以看出存在一个大约 250 天左右的周期，并且这个周期基本持续，特别是在观测时间的中段.

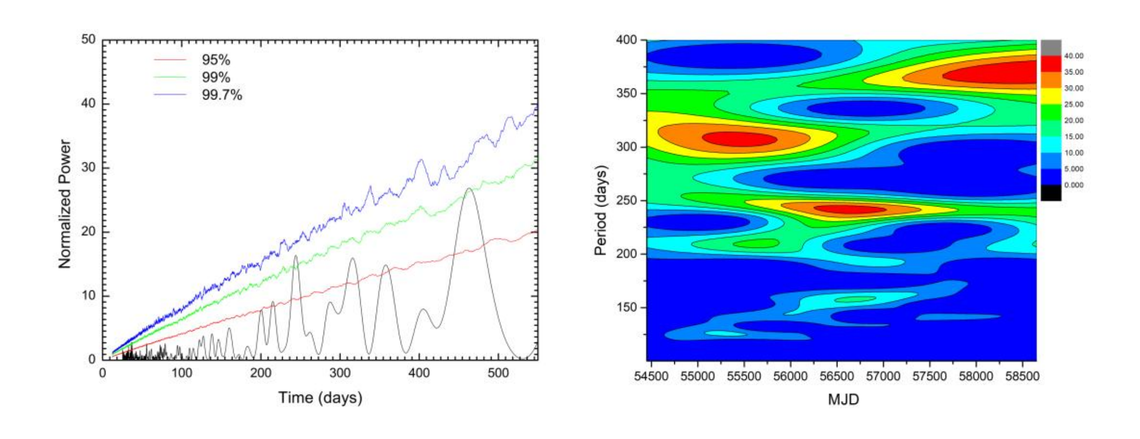


图 4 LSP 周期分析结果（左图）；WWZ 周期分析结果(右图）

Fig. 4 The results of LSP （left panel）and WWZ (right panel) period analysis

4 总结与讨论

耀变体光变曲线的主要特征是在多波段呈现出大幅快速光变且存在高偏振．通常认为相对论性喷流的聚束效应是导致这些极端观测特征出现的原因．欧文斯谷射电天文台(OVRO)的长时间监测数据显示平谱射电类星体 B3 0307+380 的 15 GHz 射电光变曲线中表现出多个爆发过程．我们利用双指数函数拟合了 12 个爆发过程，得出光变多普勒因子分布在 $(9.12\pm0.58)\sim(35.38\pm3.34)$ 范围内，平均值为 $18.65\pm7.11(sd)$．这表明 B3 0307+380 的射电辐射存在显著的多普勒增亮效应，支持被广泛接受的相对论性喷流模型.

耀变体的周期光变可能与辐射区域在喷流中沿着螺旋形轨迹作相对论性运动有关[24]. 具体来说，由于螺旋形运动导致观测视角作周期性变化，多普勒因子也发生相应的变化，从而导致多普勒增亮的辐射流量也受此效应的调制．图 5 给出了多普勒因子在 12 个爆发过程之间的变化情况．对应的 MJD 值取拟合参数 t_0 及其误差，多普勒因子 δ_V 取上升和下降阶段的平均值及其误差．从图 5 中可发现多普勒因子确随时间呈现一定的振荡．我们猜测 B3 0307+380 的射电周期光变可能与螺旋喷流模型有关．需要指出的是 B3 0307+380 的约 244 天的射电周期置信度仅为大于 2σ 水平，还有待进一步确认．另外，关于周期的解释，螺旋喷流模型仅是可能的原因，还有很多其他的机制值得参考[18][25].

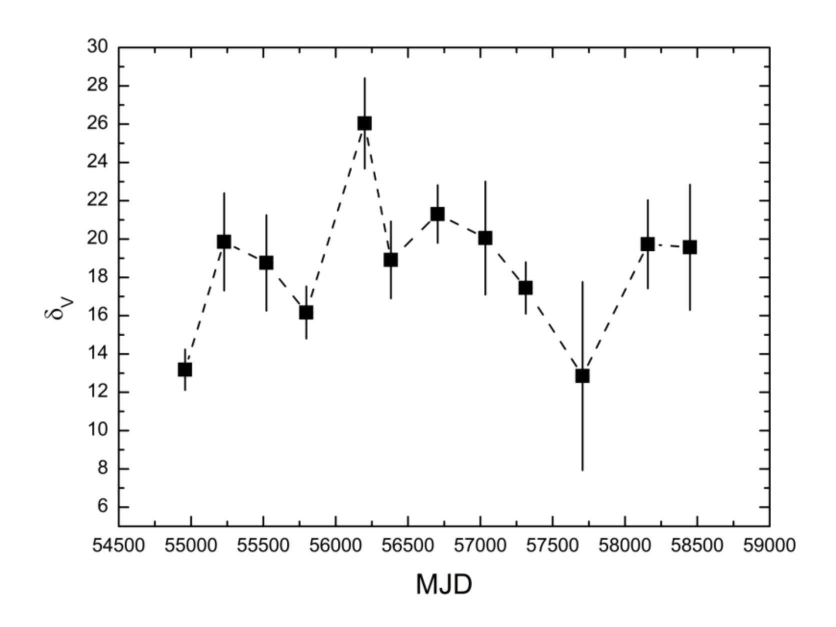


图 5 光变多普勒因子 δ_V 的变化. 每个点对应的 MJD 值取拟合参数 t_0 及其误差, δ_V 取上升和下降阶段对应多普勒因子的平均值及其误差.

Fig. 5 The variability of δ_V. The MJD of each point adopts the fitting parameter t_0 and its error, and δ_V adopts the average value of Doppler factors during the rise and decay processes and its error.

致谢：

感谢审稿人提出的宝贵建议；感谢欧文斯谷射电天文台的数据支持.

参考文献：

[1] Urry C.M., Padovani P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107: 803-845

[2] Ulrich M.-H., Maraschi L., Urry C.M.Variability of Active Galactic Nuclei[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1997, 35: 445-502

[3] Agarwal A., Cellone S.A.,Andruchow I., et al. Multiband optical variability of 3C 279 on diverse time-scales[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 488(3): 4093-4105

[4] Albert J., Aliu E.,Anderhub H., et al. Variable Very High Energy γ-Ray Emission from Markarian 501[J]. The Astrophysical Journal, 2007, 669(2): 862-883

[5] Raiteri C. M., Villata M., Aller H.D., et al. Optical and radio variability of the BL Lacertae object AO 0235+16: A possible 5-6 year periodicity[J]. Astronomy and Astrophysics, 2001, 377: 396-412

[6] Blandford R.D., Königl A. Relativistic jets as compact radio sources[J]. The Astrophysical Journal, 1979, 232: 34-38

[7] Valtaoja, E., Lähteenmäki A.,Teräsranta H., et al. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. I. Decomposition of Variations into Exponential Flares[J]. The Astrophysical Journal Supplement, 1999, 120(1): 95-99
[8] Lähteenmäki A., Valtaoja E., Wiik K., et al. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. II. Determining the Limiting Brightness Temperature for Synchrotron Sources[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 511(1): 112-117
[9] Lähteenmäki A., Valtaoja E. Total Flux Density Variations in Extragalactic Radio Sources. III. Doppler Boosting Factors, Lorentz Factors, and Viewing Angles for Active Galactic Nuclei[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 521(2): 493-501
[10] Liodakis I., Marchili N., Angelakis E., et al. F-GAMMA: variability Doppler factors of blazars from multiwavelength monitoring[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 466(4): 4625-4632
[11] Acero F., Ackermann M., Ajello M., et al. Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog[J]. The Astrophysical Journal Supplement, 2015, 218(2): 23-63
[12] Richards J.L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V., et al. Blazars in the Fermi Era: The OVRO 40 m Telescope Monitoring Program[J]. The Astrophysical Journal Supplement, 2011, 194(2): 29-50
[13] Wagner S.J., Witzel A. Intraday Variability In Quasars and BL Lac Objects[J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1995, 33: 163-198
[14] Abdo A.A., Ackermann M., Ajello M., et al. Gamma-ray Light Curves and Variability of Bright Fermi-detected Blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2010, 722(1): 520-542
[15] Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431-441
[16] Kellermann K. I., Pauliny-Toth I. I. K. The Spectra of Opaque Radio Sources[J]. The Astrophysical Journal, 1969, 155: 71-78
[17] Readhead, Anthony C. S. Equipartition brightness temperature and the inverse Compton catastrophe[J]. The Astrophysical Journal, 1994, 426(1): 51-59
[18] King O. G., Hovatta T., Max-Moerbeck W. et al. A quasi-periodic oscillation in the blazar J1359+4011[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 436(1): 114-117
[19] Gupta A.C., Tripathi A., Wiita P.J., et al. Detection of a quasi-periodic oscillation in γ-ray light curve of the high-redshift blazar B2 1520+31[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 484(4): 5785-5790
[20] Lomb N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. Astrophysics and Space Science, 1976, 39: 447-462
[21] Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data[J]. The Astrophysical Journal, 1982, 263: 835-853
[22] Torrence, C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78
[23] Timmer J., Koenig M. On generating power law noise[J]. Astronomy and Astrophysics, 1995, 300: 707-710
[24] Mohan P., Mangalam A. Kinematics of and Emission from Helically Orbiting Blobs in a Relativistic Magnetized Jet[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 805(2): 91-110
[25] Bhatta, G. Detection of Periodic Radio Signal from the Blazar J1043+2408[J]. Galaxies, 2018, 6(4): 136-146

On the 15 GHz Radio Variability of Flat-spectrum Radio Quasar B3 0307+380

Yang Xing, Yi Tingfeng, Mao Lisheng
（College of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Yunnan Kunming 650500 , Email: maolisheng@ynnu.edu.cn ）

Abstract: The long-term monitoring data of Owens Valley Radio Observatory (OVRO) show that FSRQ B3 0307+380 has many flares in the 15 GHz light curve. Based on the double exponential form function, we have fit twelve flares, then derived the variability amplitude, the rise and decay time scales of each flare, and evaluated the brightness temperature (T_b) and variability Doppler factor(δ_V). The range of δ_V is from $9.12 \pm 0.58(sd)$ to $35.38 \pm 3.34(sd)$, with the average of $18.65 \pm 7.11(sd)$. This result indicates that the radio emission is strongly beamed, and it is consistent with the well-known relativistic jet model. Making use of LSP and WWZ methods, we examined if there is a period in the radio light curve of B3 0307+380. As a result, we find a period of about 244 days with a confidence level of $> 99\%$, and give the possible explanation about this period.

Key words: Blazar; Brightness temperature; Doppler factor; Period